

STAR-RIS辅助的NOMA系统物理层安全性能优化

李美玲¹, 王玉旻¹, 王思敬¹, 张海君²

(1.太原科技大学电子信息工程学院, 山西太原 030024; 2.北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对实际通信场景中非理想信道状态信息以及非理想串行干扰删除等非理想因素的强耦合特性使可同时反射和透射的可重构智能超表面 (STAR-RIS) 辅助的非正交多址接入 (NOMA) 传输系统安全性能无法准确衡量的问题, 提出了基于惩罚对偶分解 (PDD) 和块坐标下降 (BCD) 的融合算法, 联合优化基站的波束成形矢量和 STAR-RIS 相移系数, 实现系统最低安全传输速率的最大化。结果表明, 所提融合算法相比 BCD 算法可以明显增加最低安全传输速率, 性能至少提升 10%。

关键词: 可同时反射和透射的可重构智能超表面; 非正交多址接入; 物理层安全; 块坐标下降; 惩罚对偶分解

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024094

Performance optimization of physical layer security in STAR-RIS aided NOMA system

LI Meiling¹, WANG Yumin¹, WANG Sijing¹, ZHANG Haijun²

1. School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China

2. School of Computer & Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: The strong coupling characteristics of the imperfect channel state information and the imperfect successive interference cancellation makes it faces the great challenge in evaluating the secure performance accurately for the simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface (STAR-RIS) aided non-orthogonal multiple access (NOMA) transmission systems. To address this issue, a mixed algorithm based on penalty dual decomposition (PDD) and block coordinate descent (BCD) was proposed for optimizing the beamforming vectors at the base station and the phase-shift coefficients of the STAR-RIS jointly, aiming to maximize the minimum secure transmission rate of the system. The results demonstrate that minimum secure transmission rate can be significantly enhanced by the proposed mixed algorithm compared to that by BCD algorithm, achieving the performance improvement by at least 10%.

Keywords: simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface, non-orthogonal multiple access, physical layer security, block coordinate descent, penalty dual decomposition

收稿日期: 2023-12-07; 修回日期: 2024-02-26

通信作者: 李美玲, meilingli@tyust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62001320); 山西省科技创新人才团队专项计划基金资助项目 (No.202304051001035); 山西省科技成果转化引导专项计划基金资助项目 (No.202204021301055); 山西省专利转化专项计划基金资助项目 (No.202302003); 山西省留学回国人员科研基金资助项目 (No.2021-133); 山西省科研实践创新类基金资助项目 (No.2023KY647)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62001320), The Special Fund for Science and Technology Innovation Teams of Shanxi Province (No.202304051001035), The Science and Technology Achievement Transformation Guidance Special Project of Shanxi Province (No.202204021301055), The Project for Patent Transformation of Shanxi Province (No.202302003), The Research Project Supported by Shanxi Scholarship Council of China (No.2021-133), The Graduate Education Innovation Project of Shanxi Province (No.2023KY647)

0 引言

可同时反射和透射的可重构智能超表面 (STAR-RIS, *simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface*) 技术能通过调整相位系数, 精准控制电磁波的传输和反射, 从而优化信号传输质量, 增大信号覆盖范围, 满足6G灵活的广覆盖需求^[1-3]。而5G中的非正交多址接入 (NOMA, *non-orthogonal multiple access*) 技术通过对信号进行功率域或码域的非正交复用, 可以有效提高频谱利用率^[4], 其对于6G实现更高传输速率的需求至关重要。研究表明, STAR-RIS辅助的NOMA系统能够克服通信空间的随机性, 从而进一步提高无线通信频谱效率^[5]。

此外, 无线接入也带来了更多的随机接入安全风险。物理层安全传输技术充分利用无线信道的随机性从信息论角度提升信息传输保密性。文献[6]研究了理想传输条件下STAR-RIS辅助的下行NOMA系统安全保密性能, 结果表明, STAR-RIS辅助的NOMA系统能够在抑制窃听者的同时, 进一步提高合法用户通信效率。

由于STAR-RIS辅助的NOMA系统中涉及的功率分配、波束成形和反射系数等参数相互耦合且呈非线性关系, 需要利用各种优化算法分析复杂非线性函数的最优解。文献[7]研究了STAR-RIS辅助NOMA的上行物理层安全通信场景, 考虑理想传输条件, 联合优化波束成形、发射功率和STAR-RIS反射透射矩阵, 采用交替混合波束成形算法实现保密速率最大化。文献[8]提出利用惩罚对偶分解 (PDD, *penalty dual decomposition*) 框架对无线通信信号幅度和相移系数以闭合的形式交替更新, 解决耦合约束的非凸非光滑问题。文献[9]提出了一种关于STAR-RIS的通信感知一体化框架, 对其中相互耦合的变量造成的非凸问题, 采用PDD框架的高效迭代算法处理, 但该算法需要选择合适的惩罚系数, 惩罚系数过大或过小都会导致算法收敛困难。

以上关于STAR-RIS辅助的NOMA通信系统性能研究均考虑理想传输条件。但是, 在实际通信场景下, 由于STAR-RIS无源特性, 无法主动改变反射特性发送或接收导频信号, 很难获得理想信道状态信息 (CSI, *channel state information*)。同时由于在执行NOMA解码时存在非理想串行干扰删除 (ipSIC, *imperfect successive interference cancella-*

tion) 操作, 从而无法完全消除干扰, 造成系统性能的降低^[10]。文献[11-12]研究了合法用户在ipSIC下NOMA通信系统的物理层安全中断概率以及系统吞吐量。文献[13]研究了非理想信道状态信息 (ipCSI, *imperfect CSI*) 下的STAR-RIS辅助NOMA系统的安全传输, 并采用块坐标下降 (BCD, *block coordinate descent*) 算法处理相互耦合的优化变量, 但是该算法对于含有非光滑函数的优化问题不太适用, 因为每次迭代只优化一个块变量, 会导致算法收敛缓慢。

综上所述, 目前虽然已有一些文献针对部分非理想条件所带来的复杂问题提出了解决方案, 但由于系统多种参数相互影响, 综合考虑ipCSI和ipSIC的STAR-RIS辅助NOMA安全传输性能优化尚需深入研究解决, 而非理想参数之间的强耦合性使得性能理论分析难以执行。为此, 本文基于STAR-RIS辅助的下行链路NOMA窃听系统, 联合考虑波束成形、STAR-RIS的相移系数、ipSIC以及ipCSI等因素, 构建基于系统安全通信速率最大化的分析模型, 采用PDD和BCD融合算法处理目标函数的耦合问题和非凸问题。结果表明, 所提融合算法不但能够有效处理非凸非光滑问题, 还能弥补BCD算法应对复杂目标问题时无法有效求解的问题, 可以明显增加最低安全传输速率, 性能至少提升10%。本文具体贡献介绍如下。

1) 考虑非理想因素, 通过在目标函数中加入松弛变量, 利用S-引理将最小二乘问题转化为凸优化问题, 将ipCSI不确定性转化为广义不等式。

2) 针对本文提出的联合优化问题涉及复杂的非线性耦合关系难以直接得到优化的问题, 本文采用分解优化法, 利用PDD和BCD融合算法将目标函数转化为迭代处理2个特定的优化子问题, 更高效地解决优化问题, 提高算法的收敛速度和增强算法的稳定性。

3) 面对特定优化子问题的非凸约束, 利用连续凸逼近 (SCA, *successive convex approximation*) 及罚函数将非凸约束问题近似为凸约束问题并用CVX工具求解。

4) 仿真分析了本文所提算法的性能优势以及不同STAR-RIS单元分布方案、天线数量、基站功率和信道估计误差条件对系统的影响。

注: 本文中, $\text{Tr}(\mathbf{X})$ 、 $|\mathbf{X}|$ 和 $\mathbf{X}_{m,n}$ 分别表示矩阵

X 的迹、行列式以及第 m 行第 n 列的值； \mathbb{C} 表示矩阵空间； $\text{diag}(\cdot)$ 表示以括号 (\cdot) 元素为对角线元素的对角矩阵； $\|\cdot\|$ 表示矩阵的欧氏范数； $(\cdot)^H$ 表示矩阵或矢量的共轭转置； $x \sim \mathcal{CN}(\mu, \sigma^2)$ 表示变量 x 服从均值为 μ 、方差为 σ^2 的复高斯分布， j 为虚数单位。

1 系统模型

1.1 模型描述

本文考虑基于能量分裂 (ES, energy splitting) [14] 协议的 STAR-RIS 辅助 NOMA 下行通信网络，如图 1 所示。基站 (BS, base station) 配置 M 根天线，STAR-RIS 包含 N 个反射透射单元，为 NOMA 提供通信反射透射链路，用户配置单天线。假设一簇 NOMA 内的近用户 UE_r 和远用户 UE_t 分别位于反射区域和透射区域，且每个区域内只存在一个合法用户 (UE) 和一个窃听用户 (Eve)，窃听用户只会对本区域内的 UE 感兴趣。BS 与 NOMA 用户之间的直传链路不可达，BS 到 STAR-RIS、STAR-RIS 到 UE 和 Eve 的信道系数分别为 $\mathbf{H}_{B,R} = (h_{n,m}) \in \mathbb{C}^{N \times M}$ ， $\mathbf{h}_{R,U_l}^H = [h_{1l} \cdots h_{ml} \cdots h_{Nl}]^T \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ ， $\mathbf{g}_{R,E_l}^H = [g_{1l} \cdots g_{ml} \cdots g_{Nl}]^T \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ ，其中， $h_{n,m}$ 表示经由第 m 根天线发送给第 n 个反射透射单元的信道系数且 $n \in [1, N]$ ， $m \in [1, M]$ ， h_{in} 和 g_{in} 分别表示经由第 n 个反射透射单元发送给 l 区域中的用户和窃听者的信道系数， $l \in \{r, t\}$ 表示所选区域。

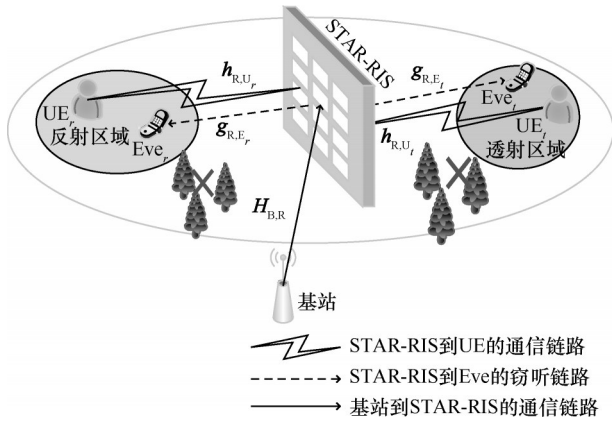


图 1 STAR-RIS 辅助 NOMA 下行通信网络

1.2 传输分析

本文考虑在非理想条件下的通信场景，因此透射区域和反射区域 Eve 的 CSI 是无法直接获取的。在 ipCSI 条件下，Eve 的信道系数可以由关于 \mathbf{g}_{R,E_l} 的估计值 $\bar{\mathbf{g}}_{R,E_l}$ 和估计误差 $\Delta \mathbf{g}_{R,E_l}$ 表示为 [15]

$$\mathbf{g}_{R,E_l} = \bar{\mathbf{g}}_{R,E_l} + \Delta \mathbf{g}_{R,E_l} \quad (1)$$

其中， $\Delta \mathbf{g}_{R,E_l}$ 属于集合 $\mathcal{Q}^l = \left\{ \Delta \mathbf{g}_{R,E_l} \in \mathbb{C}^{N \times 1}, \|\Delta \mathbf{g}_{R,E_l}\| \leq \varepsilon_l \right\}$ ，连续集 \mathcal{Q}^l 包含所有可能的 CSI 估计误差，其范数以 $\varepsilon_l > 0$ 为界限，则在当前 l 区域的 UE 和 Eve 接收到的信号分别表示为

$$y_U^l = \mathbf{h}_{R,U_l}^H \Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \sum_{l \in \{r,t\}} \omega_l s_l + n_U^l \quad (2)$$

$$y_E^l = \mathbf{g}_{R,E_l}^H \Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \sum_{l \in \{r,t\}} \omega_l s_l + n_E^l \quad (3)$$

其中， $s_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 表示 BS 发送给用户 k 的信号，且 $E[|s_k|^2] = 1$ ； $\omega_l \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 表示发射波束成形矢量； $\Phi_l = \text{diag}(\sqrt{\alpha_1^l} e^{j\theta_1^l}, \sqrt{\alpha_2^l} e^{j\theta_2^l}, \dots, \sqrt{\alpha_N^l} e^{j\theta_N^l})$ 表示 STAR-RIS 的相移矩阵，其中 $\theta_n^l \in [0, 2\pi)$ 和 $\alpha_n^l \in [0, 1]$ 分别表示 n 个透射和反射单元的相位和幅度系数，且 $\sqrt{\alpha_n^l}$ 和 $\sqrt{\alpha_n^r}$ 满足能量守恒约束 $\alpha_n^l + \alpha_n^r = 1$ ； $n_U^l \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 和 $n_E^l \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 分别表示 l 区域 UE 和 Eve 处的高斯白噪声。

1.3 接收信号干扰噪声比

考虑用户端解码用户信号存在 ipSIC 而产生干扰项，引入残留因子 $\eta \in [0, 1]$ 衡量 ipSIC 造成的性能损失 [16]。则位于 l 区域的 UE 解码区域 l' 的 UE 信号接收的信号干扰噪声比 (SINR, signal to interference plus noise ratio) 可以表示为

$$\gamma_U^{l \rightarrow l'} = \frac{\left| \mathbf{h}_{R,U_l}^H \Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \omega_{l'} \right|^2}{\sum_{\Omega(k) > \Omega(l')} \left| \mathbf{h}_{R,U_l}^H \Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \omega_k \right|^2 + I_U^{l \rightarrow l'} + \sigma^2} \quad (4)$$

其中， $l' \rightarrow l$ 表示区域 l 中的用户解码区域 l' 中的用户信号， $\Omega(\cdot)$ 表示解码顺序， $I_U^{l \rightarrow l'} = \eta \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)}$

$\left| \mathbf{h}_{R,U_l}^H \Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \omega_o \right|^2$ 表示 ipSIC 的残留项。则区域 l 中 UE 用户可达传输速率表示为

$$R_U^{l \rightarrow l'} = \text{lb}(1 + \gamma_U^{l \rightarrow l'}) \quad (5)$$

考虑区域 l 的 Eve 只对本区域内的 UE 感兴趣，且 Eve 具有较强的解码能力进行 SIC，则 l 区域 Eve 的 SINR 和可达传输速率分别可表示为

$$\gamma_E^l = \frac{\left| \mathbf{g}_{R,E_l}^H \Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \omega_l \right|^2}{\sigma^2} \quad (6)$$

$$R_E^l = \text{lb}(1 + \gamma_E^l) \quad (7)$$

结合式 (5) 和式 (7)，区域 l 的 UE 信号获得的最

低安全传输速率可表示为

$$R_U^l = [\text{lb}(1 + \gamma_U^{l \rightarrow l}) - \max_{\Delta \mathbf{g}_{R,E_l} \in \Omega^l} \text{lb}(1 + \gamma_E^l)]^+ \quad (8)$$

2 优化算法

本文的优化问题是在考虑 ipSIC 和 ipCSI 的非理想因素下, 联合优化基站的发送波束成形以及 STAR-RIS 相移系数, 最大化合法用户的最低安全速率并提升 NOMA 系统的鲁棒性。但由于非理想条件的存在, 合法用户接收端和窃听用户的 CSI 变得更加复杂, 同时波束成形矩阵、用户分组、发送功率和相移矩阵相互关联, 使优化问题的求解变得十分困难。本文考虑利用 PDD 进行双循环迭代算法, 内部迭代用于近似求解一个非凸非光滑的增广拉格朗日问题, 并采用 BCD 算法对块坐标进行求解, 外部迭代用于更新惩罚参数。

2.1 优化问题

根据上述分析, 考虑约束条件, 基站波束矩阵和 STAR-RIS 相移矩阵的联合优化问题可表示为

$$\begin{aligned} \text{P1: } & \max_{\omega_l, \Phi_l} \sum_{l \in \{r, t\}} \left[R_U^{l \rightarrow l} - \max_{\Delta \mathbf{g}_{R,E_l} \in \Omega^l} R_E^l \right]^+ \\ \text{s.t. } & \text{D1: } \sum_l \|\omega_l\|^2 \leq P_{\max} \\ & \text{D2: } R_U^{l \rightarrow l} \geq C_U \\ & \text{D3: } \max_{\Delta \mathbf{g}_{R,E_l} \in \Omega^l} R_E^{l \rightarrow l} \leq C_E \\ & \text{D4: } 0 \leq \theta^l \leq 2\pi \\ & \text{D5: } \alpha_m^l + \alpha_m^t = 1, l \neq t \\ & \text{D6: } R_U^{l \rightarrow k} \geq R_U^{t \rightarrow l}, \Omega(l) < \Omega(k) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, P_{\max} 表示基站最大发送功率限制, C_U 和 C_E 分别表示 UE 可达传输速率下限和 Eve 可达传输速率上限, D1 约束波束成形不改变信号功率, D2 和 D3 分别约束 UE 最小可达传输速率和 Eve 最大可达传输速率, D4 约束 STAR-RIS 的角度, D5 约束功率分配, D6 表示解码端使用 SIC 成功解码的约束条件。问题 P1 中的优化变量多相互耦合, 且 ipCSI 的存在导致目标函数高度复杂, 求解较为困难。本文考虑在目标函数中加入松弛变量 φ_l , 考虑 $C_U \geq C_E$, 得到简化后的目标函数表示为

$$\begin{aligned} \text{P2: } & \max_{\Phi_l, \omega_l, \varphi_l} \sum_l \left[R_U^{l \rightarrow l} - \text{lb}(1 + \varphi_l) \right] \\ \text{s.t. } & \text{D1} \sim \text{D6} \\ & \text{D7: } \varphi_l \geq \max_{\Delta \mathbf{g}_{R,E_l} \in \Omega^l} \frac{|\mathbf{g}_{R,E_l}^H \Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \omega_l|^2}{\sigma^2} \end{aligned} \quad (10)$$

显然当 D7 取等号时, 问题 P2 可以收敛至原有状态, 且约束 D3 改写为 $\varphi_l \leq 2^{C_E} - 1$ 。但由于 D7 的复杂性, 扩大此约束, 表示为

$$\text{D7: } \varphi_l \geq \frac{|\mathbf{g}_{R,E_l}^H \Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \omega_l|^2}{\sigma^2}, \forall \Delta \mathbf{g}_{R,E_l} \in \Omega^l \quad (11)$$

为了得到上述问题的次优解, 需要将上述约束优化问题转化为凸优化问题。利用 S-引理可以将最小二乘问题转化为凸优化问题, 同时将 CSI 的不确定性转化为广义不等式。假设存在 $p^{l \rightarrow l} \geq 0$, 可以令 $Z^{l \rightarrow l} = -\Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \omega_l \omega_l^H \mathbf{H}_{B,R}^H \Phi_l^H$, $\tilde{Z}^{l \rightarrow l} = (\bar{\mathbf{g}}_{R,E_l})^H \cdot Z^{l \rightarrow l} \bar{\mathbf{g}}_{R,E_l}$, 则约束 D7 可表示为

$$\text{D7: } \begin{bmatrix} \varphi_l \sigma^2 + \tilde{Z}^{l \rightarrow l} - p^{l \rightarrow l} & (\bar{\mathbf{g}}_{R,E_l})^H Z^{l \rightarrow l} \\ (Z^{l \rightarrow l})^H \bar{\mathbf{g}}_{R,E_l} & Z^{l \rightarrow l} + p^{l \rightarrow l} \varepsilon_l^{-2} I_m \end{bmatrix} \geq 0 \quad (12)$$

由于波束成形矢量定义了波束的方向, 而 STAR-RIS 相移矩阵定义了信号在 STAR-RIS 上的相位调节。因此, 问题中优化变量相互耦合, 且关于所有优化变量不是联合凸问题, 但每个优化变量块是凸问题^[17], 因此, 可将联合问题进行分解优化。由于 P2 存在多个相互耦合的优化变量 (如 ω_l , Φ_l) 和多个约束条件 (如 D6、D7), 因此采用 PDD 和 BCD 融合算法可以将 P2 问题转化为凸优化子问题, 从而有效地处理耦合凸优化问题, 先通过 PDD 算法将 P2 写为增广拉格朗日的形式如 P3, 再将原问题利用 BCD 算法分解为子问题。具体 PDD 算法如算法 1 所示。由 PDD 算法生成的联合优化问题的增广拉格朗日形式表示为

$$\begin{aligned} \text{P3: } & \max_{\Phi_l, \omega_l, \varphi_l, p^l \geq 0} \sum_l \left[R_U^{l \rightarrow l} - \text{lb}(1 + \varphi_l) \right] - \\ & \sum_l \frac{1}{2\rho} \left\| \zeta + \Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \omega_l \omega_l^H \mathbf{H}_{B,R}^H \Phi_l^H + \rho \lambda_l \right\|^2 \\ \text{s.t. } & \text{D1} \sim \text{D6} \\ & \text{D7: } \zeta = -\Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \omega_l \omega_l^H \mathbf{H}_{B,R}^H \Phi_l^H \\ & \text{D8: } \begin{bmatrix} \varphi_l \sigma^2 + (\bar{\mathbf{g}}_{R,E_l})^H \zeta \bar{\mathbf{g}}_{R,E_l} - p^{l \rightarrow l} & (\bar{\mathbf{g}}_{R,E_l})^H \zeta \\ (\zeta)^H \bar{\mathbf{g}}_{R,E_l} & \zeta + p^{l \rightarrow l} \varepsilon_l^{-2} I_m \end{bmatrix} \geq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

其中, λ_l 为拉格朗日乘子, ρ 为惩罚因子。

算法 1 PDD 算法

输入 波束成形矢量 ω 初始值, STAR-RIS 相移

矩阵 Φ 初始值, 功率约束条件, 步长参数, 收敛准则

输出 求解 P2, 增广形式

- 1) 初始化: $\omega_l^{(0)}, \Phi_l^{(0)}, \varphi_l^{(0)}, (p^l)^{(0)}, \zeta_l^{(0)}$
- 2) while(1:k)
- 3) if $\|\zeta_l + \Phi_l H_{B,R} \omega_l \omega_l^H H_{B,R}^H \Phi_l^H\|_\infty \leq \zeta_k$
- 4) $\lambda_{k+1} = \lambda_k + \frac{1}{\rho_k} (\zeta_l + \Phi_l H_{B,R} \omega_l \omega_l^H H_{B,R}^H \Phi_l^H)$
- 5) else
- 6) $\lambda_{k+1} = \lambda_k$
- 7) $\rho_{k+1} = c\rho_k, c < 1$
- 8) end if
- 9) $k = k + 1$
- 10) end while
- 11) return

进一步, 利用 BCD 算法 (如算法 2 所示), 将式(13)分解为 2 个特定子问题并使用 CVX 工具箱求解, 子问题表示如下。

子问题 1: 固定 Φ_l , 优化最低安全传输速率。

子问题 2: 固定 ω_l 、 φ_l 和 p^l , 优化最低安全传输速率。

下面分别说明这 2 个特定优化子问题的求解。

算法 2 基于 BCD 求解 P3

输入 波束成形矢量 ω 初始值, STAR-RIS 相移矩阵 Φ 初始值, 功率约束条件, 步长参数, 收敛准则, 迭代次数 num

输出 P3 的 2 个特定优化子问题

- 1) 初始化: $\omega_l^{(0)}, \Phi_l^{(0)}, \varphi_l^{(0)}, (p^l)^{(0)}, \zeta_l^{(0)}, m = 0$
- 2) for $m \leftarrow 0, 1, 2, \dots, \text{num}$
- 3) for $n \leftarrow 0, 1, 2, \dots, \text{num}$
- 4) $\Phi_l^{(m)}, \zeta_l^{(m)}, \omega_l^{(n)}$
- 5) $\omega_l^{(n+1)}, (p^l)^{n+1}, \varphi_l^{(n+1)} \leftarrow \Phi_l^{(m)}, \zeta_l^{(m)}, \omega_l^{(n)}$
- 6) $n = n + 1$
- 7) end for
- 8) if $\|\omega_l^{(n+1)} - \omega_l^{(n)}\| \leq \vartheta_l$
- 9) $\omega_l^{(m)} = \omega_l^{(n+1)}, (p^l)^{(m)} = (p^l)^{(n+1)}, \varphi_l^{(m)} = \varphi_l^{(n+1)}$
- 10) end if
- 11) for $n \leftarrow 0, 1, 2, \dots, \text{num}$
- 12) $\omega_l^{(m)}, (p^l)^{(m)}, \varphi_l^{(m)}, \Phi_l^{(n)}, \zeta_l^{(n)}$
- 13) $\Phi_l^{(n+1)}, \zeta_l^{(n+1)} \leftarrow \Phi_l^{(n)}, \zeta_l^{(n)}$

- 14) $n = n + 1$
- 15) end for
- 16) if $\|\Phi_l^{(n+1)} - \Phi_l^{(n)}\| \leq \vartheta_l$
- 17) $\Phi_l^{(m+1)} = \Phi_l^{(n+1)}, \zeta_l^{(m+1)} = \zeta_l^{(n+1)}$
- 18) $m = m + 1$
- 19) $\|(R_s^l)^{(m+1)} - (R_s^l)^{(m)}\| \leq \vartheta_l$
- 20) end if
- 21) end for

2.2 求解优化子问题 1

固定 STAR-RIS 的透射反射系数 Φ_l , P3 可重新表示为

$$\begin{aligned} \text{P4: } \max_{\omega_l, \varphi_l, p^l \geq 0} & \sum_l [R_U^{l \rightarrow l} - \text{lb}(1 + \varphi_l)] - \\ & \sum_l \frac{1}{2\rho} \|\zeta + \Phi_l H_{B,R} \omega_l \omega_l^H H_{B,R}^H \Phi_l^H + \rho \lambda_l\|^2 \\ \text{s.t. } & \text{D1} \sim \text{D3}, \text{D6}, \text{D8} \end{aligned} \quad (14)$$

不难看出, P4 中的目标函数和部分约束条件如 D6 并不满足凸问题的定义, 无法直接使用 CVX 工具箱求解, 使用 SCA 技术对原问题重新进行表示^[18]。根据 SCA 技术原理, 引入松弛变量 $\tilde{R}_U^{l \rightarrow l}$ 替换 P4 目标函数中 $R_U^{l \rightarrow l}$, 并加入新的约束条件

$$\text{D9: } \tilde{R}_U^{l \rightarrow l} \geq C_U \quad (15)$$

原约束条件可重新表示为

$$\text{D2: } \tilde{R}_U^{l \rightarrow l} \geq C_U \quad (16)$$

$$\text{D6: } R_U^{l \rightarrow k} \geq \tilde{R}_U^{l \rightarrow l}, \Omega(l) < \Omega(k) \quad (17)$$

此时, P4 中的目标函数可重新表示为

$$\begin{aligned} \max_{\omega_l, \varphi_l, p^l \geq 0, \tilde{R}_U^{l \rightarrow l}} & \sum_l [\tilde{R}_U^{l \rightarrow l} - \text{lb}(1 + \varphi_l)] - \\ & \sum_l \frac{1}{2\rho} \|\zeta + \Phi_l H_{B,R} \omega_l \omega_l^H H_{B,R}^H \Phi_l^H + \rho \lambda_l\|^2 \end{aligned} \quad (18)$$

式(15)、式(17)和式(18)均含有非凸项, 将会导致目标函数和约束条件的凹凸性难以判断, 因此考虑基于一阶泰勒展开以及连续凸近似算法对目标函数以及限制条件进行处理。这里给出引理 1 及其证明。

引理 1 若 $f(x) = \text{lb}[a + \text{Tr}(bx)]$, 当 $a \geq 0$ 时, $f(x)$ 为凹函数。

证明

对 $f(x)$ 求二阶导数, 可以得到

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} = -\frac{1}{[a + \text{Tr}(bx)]^2} \frac{1}{\ln 2} \mathbf{b}^H \mathbf{b} \leq 0 \quad (19)$$

其中, $\mathbf{b}^H \mathbf{b}$ 的 Hessian 矩阵为半正定, 则式(19)中 $f(x)$ 的 Hessian 矩阵为半负定, $f(x)$ 为凹函数成立。证毕。

2.2.1 目标函数的凸近似

由引理 1 可知, 式(18)中 $\text{lb}(1 + \varphi_l)$ 是凹函数。SCA 技术能将 $\text{lb}(1 + \varphi_l)$ 转化为凸近似表达式, 其一阶泰勒近似表示为

$$\text{lb}(1 + \varphi_l) \leq \underbrace{\text{lb}\left[1 + \varphi_l^{(n)}\right]}_{R_{E,U}^{l \rightarrow l}} + \frac{\varphi_l - \varphi_l^{(n)}}{\ln 2 \left[1 + \varphi_l^{(n)}\right]} \quad (20)$$

$$R_U^{l \rightarrow l} = \text{lb} \left[1 + \frac{\text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_l (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^l)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^l \right\}}{\sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_k (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^l)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^l \right\} + \eta \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_o (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^l)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^l \right\} + \sigma^2} \right] \quad (21)$$

其中, $\mathbf{H}_{\text{BSU}}^l = \mathbf{h}_{R,U_l}^H \Phi_l \mathbf{H}_{B,R}$, 令 $\hat{l} = \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_l (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^l)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^l \right\}$, $\hat{o} = \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_o (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^l)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^l \right\}$, $\hat{k} = \sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_k (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^l)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^l \right\}$, 则可以得到

$$\text{D9: } \tilde{R}_U^{l \rightarrow l} - \text{lb}(\hat{k} + \eta \hat{o} + \hat{l} + \sigma^2) + \text{lb}(\hat{k} + \eta \hat{o} + \sigma^2) \leq 0 \quad (22)$$

由于 $\text{lb}(\hat{k} + \eta \hat{o} + \sigma^2)$ 是非凸的, 经过 SCA 处理, 其一阶泰勒可近似为

$$\begin{aligned} \chi^U = \text{lb} \left[\frac{\sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_k^{(n)} (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^l)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^l \right\} + \eta \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_o^{(n)} (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^l)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^l \right\} + \sigma^2}{\sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^l)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^l (\mathbf{W}_k - \mathbf{W}_k^{(n)}) + \eta \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^l)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^l (\mathbf{W}_o - \mathbf{W}_o^{(n)})} \right] + \\ \ln 2 \times \text{lb} \left(\sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_k^{(n)} (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^l)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^l \right\} + \eta \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_o^{(n)} (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^l)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^l \right\} + \sigma^2 \right) \end{aligned} \quad (23)$$

2.2.3 约束条件 D6 的凸近似

对 D6 进行 SCA 处理, 其非凸部分的一阶泰勒近似为

$$\begin{aligned} \delta^U = \text{lb} \left(\frac{\sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_k^{(n)} (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^k)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^k \right\} + \eta \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_o^{(n)} (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^k)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^k \right\} + \sigma^2}{\sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^k)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^k (\mathbf{W}_k - \mathbf{W}_k^{(n)}) + \eta \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^k)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^k (\mathbf{W}_o - \mathbf{W}_o^{(n)})} \right) + \\ \ln 2 \times \text{lb} \left(\sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_k^{(n)} (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^k)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^k \right\} + \eta \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_o^{(n)} (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^k)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^k \right\} + \sigma^2 \right) \end{aligned} \quad (24)$$

其中, $\mathbf{H}_{\text{BSU}}^k = \mathbf{h}_{R,U_k}^H \Phi_k \mathbf{H}_{B,R}$, 令 $l^* = \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_l (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^k)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^k \right\}$,

$$o^* = \sum_{\Omega(o) > \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_o (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^k)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^k \right\}, \quad k^* = \sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ \mathbf{W}_k (\mathbf{H}_{\text{BSU}}^k)^H \mathbf{H}_{\text{BSU}}^k \right\},$$

则 D6 的凸近似表示为

$$\tilde{R}_U^{l \rightarrow l} - \text{lb}(k^* + \eta o^* + l^* + \sigma^2) + \delta^U \leq 0 \quad (25)$$

此外, ω_l 的二次约束 D1 也可写为线性约束

$$\text{D1: } \sum_l \text{Tr}(\mathbf{W}_l) \leq P_{\max} \quad (26)$$

则问题 P4 在第 $n + 1$ 次迭代时近似为

其中, $\varphi_l^{(n)}$ 为 SCA 算法中第 n 次迭代后变量 φ_l 的值, $R_{E,U}^{l \rightarrow l}$ 表示第 n 次迭代后变量的一阶泰勒近似。

2.2.2 约束条件 D9 的凸近似

对于 D9, 首先令 $\mathbf{W}_l = \omega_l \omega_l^H$, 根据迹函数性质, 将 UE 传输速率 $R_U^{l \rightarrow l}$ 化为

$$\text{P5: } \max_{\omega_l, \varphi_l, \rho^l \geq 0, \tilde{R}_U^{l \rightarrow l}} \sum_l \left[\tilde{R}_U^{l \rightarrow l} - R_{E,U}^{l \rightarrow l} \right] -$$

$$\sum_l \frac{1}{2\rho} \left\| \zeta + \Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \omega_l \omega_l^H \mathbf{H}_{B,R}^H \Phi_l^H + \rho \lambda_l \right\|^2$$

$$\text{s.t. } \text{D1} \sim \text{D3}, \text{D6}, \text{D8}, \text{D9}$$

$$\text{D10: } \mathbf{W}_l \geq 0$$

$$\text{D11: Rank}(\mathbf{W}_l) = 1 \quad (27)$$

由 SDR 可知^[19], 约束条件 D10 和 D11 是由变量 \mathbf{W}_l 而引入的 2 个新的限制条件。

$$\text{D11: } \|\mathbf{W}_l\|_* - \|\mathbf{W}_l\|_2 \leq 0 \quad (28)$$

其中, $\|\cdot\|_*$ 和 $\|\cdot\|_2$ 分别表示核范数和谱范数, 易于证明两者等价, 证明过程如下。

证明 根据 $\text{Rank}(\mathbf{W}_l) = 1$, 可知 \mathbf{W}_l 只有一个非零特征值, 即 $\text{Rank}(\mathbf{W}_l) = 1$, 证毕。

将 $\|\mathbf{W}_l\|_* - \|\mathbf{W}_l\|_2 \leq 0$ 用于罚函数处理, 由谱范数的性质可知 $\|\mathbf{W}_l\|_2$ 是非凸的, 使用 SCA 处理此非凸函数。则上述问题 P5 可重新表示为

$$\begin{aligned} \text{P6: } & \max_{\omega_l, \varphi_l, p^l \geq 0, \tilde{R}_U^{l \rightarrow l}} \sum_l \left[\tilde{R}_U^{l \rightarrow l} - R_{E,U}^{l \rightarrow l} \right] - \\ & \sum_l \frac{1}{2\rho} \left\| \xi + \Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \omega_l \omega_l^H \mathbf{H}_{B,R}^H \Phi_l^H + \rho \lambda_l \right\|^2 + \\ & \rho \left(\|\mathbf{W}_l\|_2^{\text{LB}} - \|\mathbf{W}_l\|_* \right) \\ \text{s.t. } & \text{D1} \sim \text{D3}, \text{D6}, \text{D8}, \text{D9} \end{aligned} \quad (29)$$

其中, $\|\mathbf{W}_l\|_2^{\text{LB}}$ 为 $\|\mathbf{W}_l\|_2$ 的一阶泰勒近似, ρ 为惩罚因子。此外, 由于优化变量 \mathbf{W}_l 秩为 1, 可以用特征值分解恢复 ω_l 。

2.3 求解优化子问题 2

固定 ω_l 、 φ_l 和 p^l , 最低安全传输速率优化问题转化为

$$\begin{aligned} \text{P7: } & \max_{\Phi_l, \xi} \sum_l \left[R_U^{l \rightarrow l} - \text{lb}(1 + \varphi^l) \right] - \\ & \sum_l \frac{1}{2\rho} \left\| \xi + \Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \omega_l \omega_l^H \mathbf{H}_{B,R}^H \Phi_l^H + \rho \lambda_l \right\|^2 \\ \text{s.t. } & \text{D2}, \text{D4} \sim \text{D6}, \text{D8} \end{aligned} \quad (30)$$

$$R_U^{l \rightarrow l} = \text{lb} \left(1 + \frac{\text{Tr} \left\{ I_l (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,l})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,l} \right\}}{\sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ I_l (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,k})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,k} \right\} + \eta \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ I_l (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,o})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,o} \right\} + \sigma^2} \right) \quad (34)$$

为了便于分析, 令 $\tilde{l} = \text{Tr} \left\{ I_l (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,l})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,l} \right\}$, $\tilde{o} = \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ I_l (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,o})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,o} \right\}$, $\tilde{k} = \sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} \text{Tr}$

$\left\{ I_l (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,k})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,k} \right\}$ 。则式(33)可重新表示为

$$\tilde{R}_U^{l \rightarrow l} - \text{lb}(\tilde{k} + \eta \tilde{o} + \tilde{l} + \sigma^2) + \text{lb}(\tilde{k} + \eta \tilde{o} + \sigma^2) \leq 0 \quad (35)$$

其中, $\text{lb}(\tilde{k} + \eta \tilde{o} + \sigma^2)$ 为凹函数, 经 SCA 处理后, 其一阶泰勒近似表示为

$$\begin{aligned} \beta^U = & \text{lb} \left(\sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ I_l^{(n)} (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,k})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,k} \right\} + \eta \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ I_l^{(n)} (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,o})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,o} \right\} + \sigma^2 \right) + \\ & \frac{\left(\sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,k})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,k} + \eta \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,o})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,o} \right) (I_l - I_l^{(n)})}{\ln 2 \times \text{lb} \left(\sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ I_l^{(n)} (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,k})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,k} \right\} + \eta \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ I_l^{(n)} (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,o})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,o} \right\} + \sigma^2 \right)} \end{aligned} \quad (36)$$

其中, 优化变量 Φ_l 为对角阵, 在优化过程中为了降低复杂度, 先将 Φ_l 写为列向量的形式, 设 $\mathbf{i}_l = \left[\sqrt{\alpha_1^l} e^{j\theta_1^l}, \sqrt{\alpha_2^l} e^{j\theta_2^l}, \dots, \sqrt{\alpha_N^l} e^{j\theta_N^l} \right]^H$, 即 \mathbf{i}_l 中每个元素与 Φ_l 中对角线上的各元素对应, 有 $\mathbf{h}_{R,U}^H \Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \omega_l = \mathbf{h}_{R,U}^H \text{diag}(\mathbf{H}_{B,R} \omega_l) \mathbf{i}_l$, 则约束 D8 中 $Z^{l \rightarrow l}$ 将被重新表示为

$$\begin{aligned} Z^{l \rightarrow l} = & -\Phi_l \mathbf{H}_{B,R} \omega_l \omega_l^H \mathbf{H}_{B,R}^H \Phi_l^H = \\ & -\text{diag}(\mathbf{H}_{B,R} \omega_l) \mathbf{i}_l (\mathbf{i}_l)^H \left[\text{diag}(\mathbf{H}_{B,R} \omega_l) \right]^H \end{aligned} \quad (31)$$

假设 $I_l = \mathbf{i}_l (\mathbf{i}_l)^H$, $\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,l} = \mathbf{h}_{R,U}^H \text{diag}(\mathbf{H}_{B,R} \omega_l)$, 引入松弛变量 $\tilde{R}_U^{l \rightarrow l}$, 得到新的约束为

$$\text{D12: } \tilde{R}_U^{l \rightarrow l} \leq R_U^{l \rightarrow l} \quad (32)$$

则约束 D6 被替换为

$$\text{D6: } R_U^{l \rightarrow k} \geq \tilde{R}_U^{l \rightarrow l}, \Omega(l) < \Omega(k) \quad (33)$$

目标函数中非凸项 $\text{lb}(1 + \varphi^l)$ 用问题 P6 中 $R_{E,U}^{l \rightarrow l}$ 替代。而 D12 存在非凸项, 导致约束的凹凸性难以判断, 因此将对约束条件做凸近似处理。

2.3.1 约束条件 D12 的凸近似

用户 UE 的可达传输速率可表示为

则式(32)的凸近似表示为

$$\widehat{R}_U^{l \rightarrow l} - \text{lb}(\tilde{k} + \eta\tilde{\sigma} + \tilde{l} + \sigma^2) + \beta^U \leq 0 \quad (37)$$

$$\lambda^U = \text{lb} \left(\sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ I_k^{(n)} (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,k})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,k} \right\} + \eta \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ I_k^{(n)} (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,o})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,o} \right\} + \sigma^2 \right) + \frac{\left(\sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,k})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,k} + \eta \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,o})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,o} \right) (I_k - I_k^{(n)})}{\ln 2 \times \text{lb} \left(\sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ I_k^{(n)} (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,k})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,k} \right\} + \eta \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ I_k^{(n)} (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,o})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,o} \right\} + \sigma^2 \right)} \quad (38)$$

则约束 D6 的凸近似可重新表示为

$$\widehat{R}_U^{l \rightarrow l} - \text{lb}(\bar{k} + \eta\bar{\sigma} + \bar{l} + \sigma^2) + \lambda^U \leq 0 \quad (39)$$

其中, $\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{l,l} = \mathbf{h}_{\text{R,U}}^H \text{diag}(\mathbf{H}_{\text{B,R}} \boldsymbol{\omega}_l)$ 。为了方便分析,

令 $\bar{k} = \sum_{\Omega(k) > \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ I_k (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,k})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,k} \right\}$, $\bar{\sigma} = \sum_{\Omega(o) < \Omega(l)} \text{Tr} \left\{ I_k (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,o})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,o} \right\}$, $\bar{l} = \text{Tr} \left\{ I_k (\mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,l})^H \mathbf{K}_{\text{BSU}}^{k,l} \right\}$, 由于 $I_l = \mathbf{i}_l (\mathbf{i}_l)^H$ 使 $I_l \geq 0$, $\text{Rank}(I_l) = 1$ 约束的处理与优化子问题 1 的处理方法相同, 即使用罚函数处理, 则原优化子问题可重新表示为

$$\begin{aligned} \text{P7: } \max_{i, \zeta} \sum_l \left[\widehat{R}_U^{l \rightarrow l} - R_{\text{E,U}}^{l \rightarrow l} \right] + \rho \left(\|I_l\|_2^{\text{LB}} - \|I_l\|_* \right) - \frac{1}{2\rho} \left\| \zeta + \text{diag}(\mathbf{H}_{\text{B,R}} \boldsymbol{\omega}_l) I_l \left[\text{diag}(\mathbf{H}_{\text{B,R}} \boldsymbol{\omega}_l) \right]^H + \rho \lambda_l \right\|^2 \\ \text{s.t. } \text{D4} \sim \text{D6}, \text{D8}, \text{D12} \\ \text{D13: } \widehat{R}_U^{l \rightarrow l} \geq C_U \\ \text{D14: } I_l \geq 0 \end{aligned} \quad (40)$$

其中, 约束 D4 和约束 D5 可以用线性约束替换, 线性约束表示为

$$\text{D15: } \sum_l \text{diag}(I_l) = 1 \quad (41)$$

存在第 k 个元素为 1、其余元素都为 0 的列向量 \mathbf{v}^k , 使 $(\mathbf{v}^k)^T I_l \mathbf{v}^k = I_l^{(k,k)}$, $1 \leq k \leq N$, 其中, (k,k) 表示矩阵第 k 行第 k 列的元素。则 D15 可以另写为

$$\text{D15: } \sum_l (\mathbf{v}^k)^T I_l \mathbf{v}^k = 1, 1 \leq k \leq N \quad (42)$$

通过上述分析, 优化子问题可重新表示为

$$\begin{aligned} \text{P7: } \max_{i, \zeta} \sum_l \left[\widehat{R}_U^{l \rightarrow l} - R_{\text{E,U}}^{l \rightarrow l} \right] + \rho \left(\|I_l\|_2^{\text{LB}} - \|I_l\|_* \right) - \frac{1}{2\rho} \left\| \zeta + \text{diag}(\mathbf{H}_{\text{B,R}} \boldsymbol{\omega}_l) I_l \left[\text{diag}(\mathbf{H}_{\text{B,R}} \boldsymbol{\omega}_l) \right]^H + \rho \lambda_l \right\|^2 \\ \text{s.t. } \text{D6}, \text{D8}, \text{D12} \sim \text{D15} \end{aligned} \quad (43)$$

2.3.2 约束条件 D6 的凸近似

类似地, 约束 D6 中非凸部分的一阶泰勒近似为

通过上述分析, 优化问题 P7 已经化为标准凸问题, 至此可以使用 CVX 工具求解, 本文不再过多赘述。

3 仿真结果及分析

本节设置实验参数并使用 MATLAB 对所提系统进行性能的评估, 分析比较所提算法以及仅使用 BCD 算法的收敛性和 STAR-RIS 的性能。若无特殊说明, 仿真所用参数均为默认参数。仿真相关参数如表 1 所示。

表 1 仿真相关参数

仿真参数名称	仿真数值
基站位置/m	(0,0,√5)
STAR-RIS 位置/m	(0,100,√5)
反射区域 UE 位置/m	(0,93,0)
反射区域 Eve 位置/m	(36,66,0)
透射区域 UE 位置/m	(0,107,0)
透射区域 Eve 位置/m	(36,134,0)
莱斯因子	$\beta_h = 5$
路径损耗指数	$\tau_h = 2.2$
参考路径损耗/dB	$L = -30$
信道噪声功率/dBm	$\sigma^2 = -80$
ipCSI 信道估计误差	$\delta^2 = 0.3$
ipSIC 残留因子	$\eta = 0.1$

3.1 仿真设置

假设各节点间信道服从莱斯衰落, 信道模型表示为

$$\mathbf{h} = \sqrt{Ld^{\tau_h}} \left(\sqrt{\frac{\beta_h}{\beta_h + 1}} \mathbf{h}^{\text{LOS}} + \sqrt{\frac{1}{\beta_h + 1}} \mathbf{h}^{\text{NLOS}} \right) \quad (44)$$

其中, $\mathbf{h} \in \{ \mathbf{H}_{\text{B,R}}, \mathbf{h}_{\text{R,U}}^H, \mathbf{g}_{\text{R,E}}^H \}$, $\sqrt{Ld^{\tau_h}}$ 为路径损耗, L 为参考距离为 1 m 时的路径损耗系数, d 为参考距离, τ_h 为路径损耗指数, β_h 为莱斯因子, \mathbf{h}^{LOS} 为视

距传输部分的信道系数矩阵, 根据发射天线的方位角和仰角生成, \mathbf{h}^{NLOS} 为非视距传输部分的信道系数矩阵, 矩阵中各元素为复高斯随机变量。

3.2 仿真分析

仿真同时给出 5 种通信传输系统方案, 考虑不同反射单元个数进行性能对比及相应计算复杂度分析。具体方案以及计算复杂度介绍如下。

方案 1。传统 RIS-NOMA 系统使用 BCD 算法优化, RIS 单元工作在反射模式, 且 $\alpha'' = 0.5$, $\alpha' = 0.5$ 。此方案计算复杂度为 $O[I(2N + K)]$ 。

方案 2。传统 RIS-OMA 系统使用 BCD 算法优化, RIS 单元工作在反射模式, 且 $\alpha'' = 1$ 。此方案计算复杂度为 $O[I(N + K)]$ 。

方案 3。固定振幅 STAR-RIS-NOMA 系统使用 BCD 算法优化, STAR-RIS 单元工作在反射和透射模式, 且 $\alpha'' = \alpha' = 0.5$ 。此方案计算复杂度为 $O[I(2N + K)]$ 。

方案 4。可变相位振幅控制 STAR-RIS-NOMA 系统使用 BCD 算法优化, STAR-RIS 单元工作在透射和反射模式, 且 $\alpha'' + \alpha' = 1$ 。此方案计算复杂度为 $O[I(4N + K)]$ 。

方案 5。可变相位振幅控制 STAR-RIS-NOMA 系统使用所提算法优化, STAR-RIS 单元工作在透射和反射模式, 且 $\alpha'' + \alpha' = 1$ 。此方案计算复杂度为 $O[I^2(4N + K)]$ 。

需要说明的是, 上述 5 种方案中的 I 分别代表 5 种方案下的迭代次数, 在本文中迭代次数取值为 100 次。

图 2 对比了不同方案的收敛性。从图 2 中可以看出, 各方案最低安全传输速率逐渐增加并呈现收敛的趋势, 且本文所提算法与 BCD 算法相比具有更高的速率上限, 两者相差约 10%。这主要是基站处波束成形矢量与 STAR-RIS 相移系数之间的耦合造成 BCD 算法的性能降低, 而本文所提算法利用不同子问题之间的相关性和耦合关系。这种分解和求解的策略使算法能够更充分地利用问题的结构信息和特性, 从而更快地收敛到全局最优解。此外, 相较于只反射 RIS 的传统方法, 固定振幅和可变振幅下的 STAR-RIS 都表现出更好的性能, 证明了 STAR-RIS 的优越性。

图 3 分析了信道估计误差与最低安全传输速率之间的关系。为了方便衡量, 对信道估计误差进行

归一化处理^[20], 即信道估计误差 $o_l = \frac{\varepsilon_l^2}{\|\bar{\mathbf{g}}_{\text{R},E_l}\|^2}$ 。此

外, 大部分窃听者工作在非合作模式下, 即没有任何合作信号可以被基站接收, 窃听者信道较难获取。但随着毫米波雷达的发展, 通信感知一体化技术可以用于支持窃听者信道的估计。该技术通过信号回波估计目标窃听者的方向和距离, 从而完成信道估计。目前, 已有通感一体化估计算法可以达到的角度估计误差在 5° 以内, 其对应的归一化信道估计误差在 50% 左右^[21]。鉴于本文考虑较差情况下的窃听者信道估计精度, 本文将归一化信道估计误差设置在 0.3~0.6。从图 3 可以看到, 5 种方案均为单元数越多性能越优越。相比传统的交替优化方案, 引入 PDD 算法的系统整体有更好的性能。此外, 随着估计误差的增大, 所有方案的最低安全传输速率呈下降趋势。但与其他方案相比, 在单元数量相同时, 可变振幅下的 STAR-RIS 始终具有更高的最低安全传输速率。这是因为可变振幅控制下的 STAR-RIS 具有更高的自由度, 具体解释为 STAR-RIS 能够根据信道状态实时调整智能表面单元的振幅, 从而实现信号的有效调节和优化。通过动态调整振幅, STAR-RIS 能够实现更精确的相位控制和信号增强, 进一步改善信道传输质量和抑制干扰。

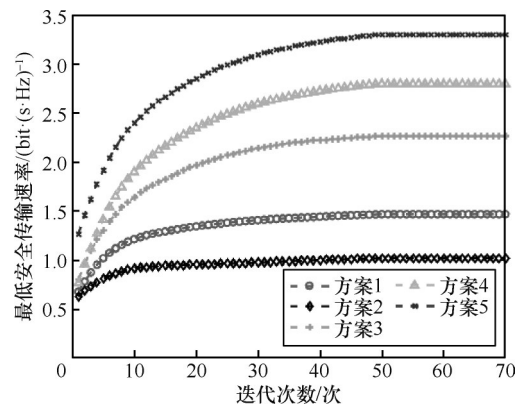


图 2 不同方案的收敛性

图 4 分析了天线数量与最低安全传输速率之间的关系。可以观察到, 在单元数量保持不变的情况下, 随着天线数量的增加, 所有方案的最低安全传输速率逐渐增加。这是因为增加基站处的天线数量可以增加可重构智能表面反射波的多样性、功率和信号处理自由度。通过增加天线数量, 系统能够利

用更多的自由度来调整反射波的相位和振幅,从而更有效地优化信号的传输和接收。这样,通信系统可以获得更强的信号强度和更低的传输衰减,从而提高通信速率和可靠性。另外,从结果中观察到方案 5 在所有方案中具有最高的最低安全传输速率。这是因为可变振幅 STAR-RIS 能够灵活地调整各个单元的振幅,以最大限度地优化反射信号的强度和方向性,能够更好地提高信号的传输质量和抵消干扰,从而实现更高的安全通信速率。值得注意的是,仿真结果还显示引入 PDD 算法明显提升了系统性能。然而,即使在引入 PDD 算法后,可变振幅 STAR-RIS 仍然展现出更高的性能。这表明可变振幅 STAR-RIS 方案在优化安全通信速率方面仍具有明显优势。

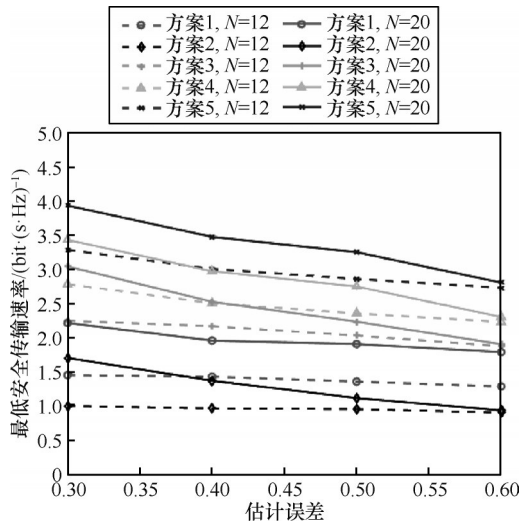


图3 信道估计误差与最低安全传输速率之间的关系

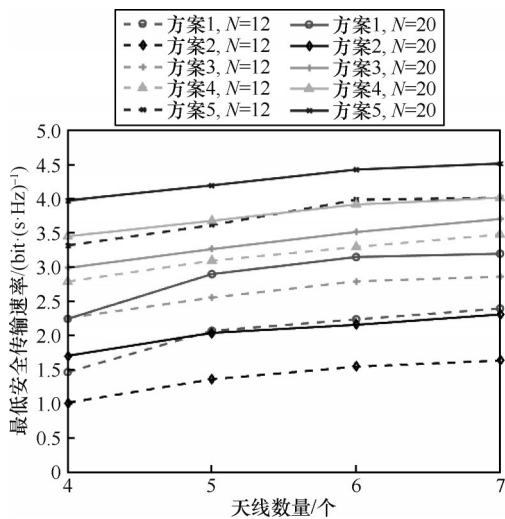


图4 天线数量与最低安全传输速率之间的关系

图 5 分析了基站发射功率与最低安全传输速率之间的关系。结果显示,随着基站发射功率的增加,整个系统的性能逐渐提高。这是因为增大基站发射功率能够增强信号的强度,使接收器更好地接收到信号,并有效抵消传输路径中的信号衰减以及干扰噪声,同时也能够减少由 ipCSI 引起的干扰。其次,可变振幅方案系统的性能明显优于仅采用 RIS 的方案。这是因为可变振幅方案能够灵活调整 RIS 元素的振幅,从而实现信号的精确控制。通过优化振幅分配,系统可以更好地利用 RIS 反射和干扰消除的能力,进一步提高信号的强度和质量,从而提升安全通信速率。此外,引入 PDD 算法后,系统性能进一步提升。通过更好地优化 RIS 元素的相位和振幅分配,融合算法进一步增强了信号的强度和质量,使系统在保证安全通信的前提下实现更高的速率上限。

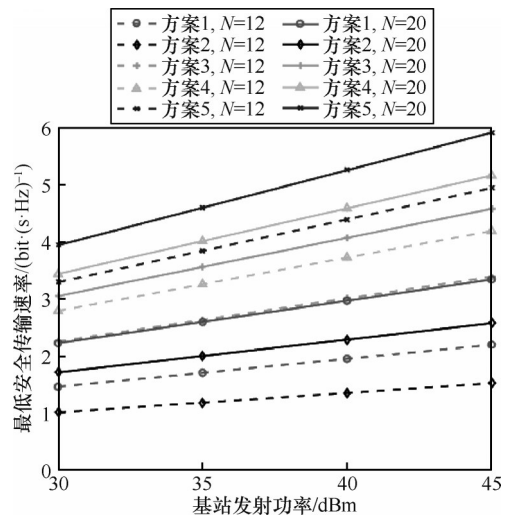


图5 基站发射功率与最低安全传输速率之间的关系

智能反射面单元个数与最低安全传输速率之间的关系如图 6 所示。从图 6 可以观察到,随着智能反射面单元个数的增加,最低安全传输速率呈现逐渐增加的趋势。首先,融合算法方案在所有方案中表现最优,其最低安全传输速率随智能反射面单元个数的增加而显著增加。这是因为融合算法采用了一种更有效的优化策略,能够更充分地利用问题的结构信息和特性,从而更快地收敛到全局最优解。因此,随着智能反射面单元个数的增加,融合算法能够更好地优化系统参数,提升安全通信速率。其次,可变振幅 STAR-RIS 在所有方案中表现较好,

其最低安全传输速率也随智能反射面单元个数的增加而增加,这是因为其能够灵活调整反射系数以适应不同的信道条件。因此,增加智能反射面单元个数可以提供更多的自由度用于优化反射系数,进而提高安全通信速率。可变振幅 STAR-RIS 方案的最低安全传输速率相对较低,虽然随着智能反射面单元个数的增加而增加,但增长速度较慢。这是因为可变振幅 STAR-RIS 在优化过程中需要考虑振幅调节的复杂性,导致性能提升受限。固定振幅 STAR-RIS 和普通 RIS 的变化趋势相近且较为接近,这是因为它们在优化过程中不考虑振幅调节,只利用相位调节进行优化。因此,它们的性能改善主要依赖于相位的调节,而随着智能反射面单元个数的增加,相位调节的自由度并未显著增加,导致性能改善有限。

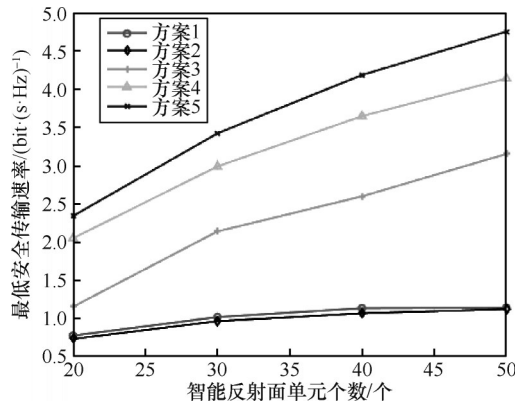


图6 智能反射面单元个数与最低安全传输速率之间的关系

图7分析了 ipSIC 残留因子与最低安全传输速率之间的关系,其中, ipSIC 系数设置为 0.1~0.4。从图7可以看到,5种方案的最低安全传输速率均随着 ipSIC 的增大而降低。但是与传统的 BCD 算法优化方案相比,融合 PDD 算法的系统整体有更好的性能。与其他方案相比,在单元数量相同时,可变振幅下的 STAR-RIS 始终具有更高的最低安全传输速率。可变振幅控制允许系统更灵活地配置 STAR-RIS 的资源,通过调整振幅,可以更有效地利用 STAR-RIS 的反射特性,来提高信号的传输效率。

4 结束语

通过对 ipSIC 与 ipCSI 的 STAR-RIS 辅助 NOMA 系统物理层安全性能的研究,本文通过优化基站的主动波束成形和 STAR-RIS 的相移系数,实现了系

统最低安全传输速率的最大化。采用 S-引理解决了 ipCSI 引起的非凸问题,并通过融合 BCD 和 PDD 算法的优化方案解决了优化变量耦合的问题。仿真结果显示,在引入 PDD 算法后,系统性能相较于传统的 BCD 算法有了显著的提高。此外,本文讨论了基站天线数量以及窃听者链路信道估计误差对安全通信速率的影响。结果表明,增加基站天线数量可以提高安全通信速率,而窃听者链路的信道估计误差会对系统性能产生一定影响。

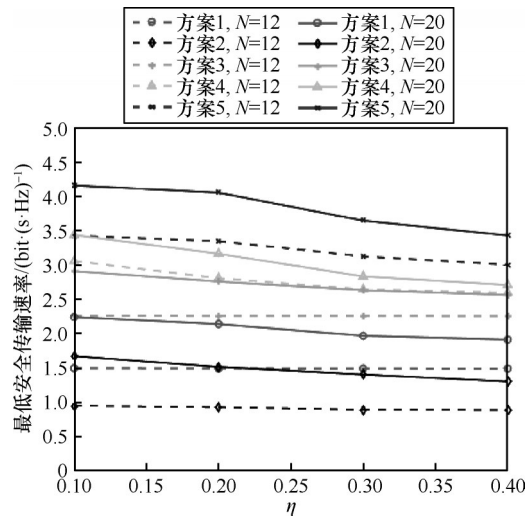


图7 ipSIC 残留因子与最低安全传输速率之间的关系

参考文献:

- [1] XU J Q, LIU Y W, MU X D, et al. STAR-RISs: simultaneous transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(9): 3134-3138.
- [2] 张海君, 陈安琪, 李亚博, 等. 6G 移动网络关键技术[J]. 通信学报, 2022, 43(7): 189-202.
ZHANG H J, CHEN A Q, LI Y B, et al. Key technologies of 6G mobile network[J]. Journal on Communications, 2022, 43(7): 189-202.
- [3] WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: joint active and passive beamforming design[C]//Proceedings of the 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [4] 李美玲, 李莹, SAMI Muhaidat, 等. 认知协作网络中非正交多址接入技术性能研究[J]. 通信学报, 2018, 39(9): 57-66.
LI M L, LI Y, SAMI M, et al. Research on the NOMA performance in cognitive cooperation network[J]. Journal on Communications, 2018, 39(9): 57-66.
- [5] ZHU J, GAO P Y, CHEN G J, et al. Index modulation for STAR-RIS assisted NOMA system[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(2): 716-720.
- [6] LI X W, ZHENG Y K, ZENG M, et al. Enhancing secrecy performance for STAR-RIS NOMA networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(2): 2684-2688.

- [7] ZHANG Z, CHEN J, LIU Y W, et al. On the secrecy design of STAR-RIS assisted uplink NOMA networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(12): 11207-11221.
- [8] SHI Q J, HONG M Y. Penalty dual decomposition method for nonsmooth nonconvex optimization—part I: algorithms and convergence analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020, 68: 4108-4122.
- [9] WANG Z L, MU X D, LIU Y W. STARS enabled integrated sensing and communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(10): 6750-6765.
- [10] LI M L, YUAN H, YUE X W, et al. Secrecy outage analysis for alamouti space-time block coded non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(7): 1405-1409.
- [11] CHAUHAN A, GHOSH S, JAISWAL A. RIS partition-assisted non-orthogonal multiple access (NOMA) and quadrature-NOMA with imperfect SIC[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(7): 4371-4386.
- [12] 李美玲, 陈琴, 杨晓霞, 等. 非理想硬件条件下协作NOMA系统安全中断性能研究[J]. 电子学报, 2021, 49(7): 1354-1362.
LI M L, CHEN Q, YANG X X, et al. Research on secrecy outage performance of cooperative NOMA system with residual hardware impairment[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(7): 1354-1362.
- [13] WANG W, NI W L, TIAN H, et al. Safeguarding NOMA networks via reconfigurable dual-functional surface under imperfect CSI[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2022, 16(5): 950-966.
- [14] LIU Y W, MU X D, XU J Q, et al. STAR: simultaneous transmission and reflection for 360° coverage by intelligent surfaces[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(6): 102-109.
- [15] YU X H, XU D F, SUN Y, et al. Robust and secure wireless communications via intelligent reflecting surfaces[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(11): 2637-2652.
- [16] YUE X W, LIU Y W, YAO Y Y, et al. Secure communications in a unified non-orthogonal multiple access framework[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(3): 2163-2178.
- [17] NECOARA I. Random coordinate descent algorithms for multi-agent convex optimization over networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(8): 2001-2012.
- [18] RAZAVIYAYN M. Successive convex approximation: analysis and applications[D]. Twin Cities: The University of Minnesota Digital Conservancy, 2014.
- [19] LUO Z Q, MA W K, SO A M C, et al. Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 27(3): 20-34.
- [20] WANG P Y, WANG H, MA H C, et al. Sum rate maximization for STAR-RIS aided NOMA system with two-way communication[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(10): 2857-2861.
- [21] LIU F, LIU Y F, LI A, et al. Cramér-Rao bound optimization for joint radar-communication beamforming[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2022, 70: 240-253.

[作者简介]



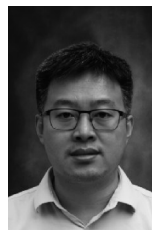
李美玲 (1982-), 女, 山西宁武人, 太原科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动通信关键技术, 包括认知无线电、V2X、协同通信、非正交多址和物理层安全等。



王玉旻 (1996-), 男, 山西太原人, 太原科技大学硕士生, 主要研究方向为非正交多址、物理层安全等。



王思敬 (1997-), 男, 山西运城人, 太原科技大学硕士生, 主要研究方向为智能反射面通信等。



张海君 (1985-), 男, 辽宁朝阳人, 博士, 北京科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为6G移动通信、人工智能、无线网络、机器学习等。